水肥耦合对油松生态林林木生长的影响

张听雨[1]，彭祚登[1*]，贾素苹[2]，贾建学[2]，于凌霄[2]

（1. 北京林业大学 林学院，北京 100083；2. 北京市大兴区林业工作站， 北京 102600）

摘要：由于北京平原沙地土壤水养贫瘠，油松生态林大苗造林后林木生长状况普遍较为缓慢。为减少植株定植后的死亡率，在控制成本的基础上，促进油松良好生长，该研究采用裂区实验设计方法，选取 3 个灌水水平与 3 个园林废弃物有机肥施用量进行比较试验，通过测定油松树高、胸径、叶绿素及叶片养分含量指标探究灌溉和施用有机肥对油松林木生长的影响。结果表明：(1)灌溉可以显著提高油松在胸径、树高、生理等方面的生长指标，树高和胸径在中水灌溉处理（A2）下的促进效果甚至高于高水灌溉处理（A3）。(2)施肥 1 a 后，施肥对油松的生长影响显著，但三个施肥水平间的差异不显著。(3)施肥 1 a 后，灌溉与施用有机肥之间不存在显著交互作用。施肥灌溉对油松的生长会产生显著的促进作用，从施肥灌溉的效果并综合考虑资源利用效率的角度考虑，少量施用有机肥，并以 80 L·（10 天·株·次）$^{-1}$ 的灌水量在生长季（4 月—9 月）进行滴灌是较为经济、有效的油松生态林管护措施。

关键词：油松，灌溉，施肥，林木生长

中图分类号：Q945.1　　　　　　**文献标识码：**A

Effect of water fertilizer coupling on the growth of *Pinus tabulaeformis* ecological forest

ZHANG Tingyu[1], PENG Zuodeng[1*], JIA Suping[2], JIA Jianxue[2], YU Lingxiao[2]

(1. *College of forestry, Beijing Forestry University*, Beijing 100083, China; 2. *Beijing Daxing Forestry Workstation*, Beijing 102600, China)

Abstract: Due to the poor soil water supply in the sandy land of Beijing plain, the growth status of *Pinus tabulaeformis* ecological forest after afforestation is generally poor. In order to explore the effects of irrigation and application of organic fertilizer on the growth of *P. tabulaeformis*. The split area experiment design method was adopted in this study. Three irrigation levels and three application amounts of organic fertilizer of garden waste were selected for comparative experiment. The effects of different treatments on the growth of *P. tabulaeformis* forest were studied by measuring the height, DBH, chlorophyll and leaf nutrient content indexes of *P. tabulaeformis* forest. The results were as follows: (1) Irrigation can significantly improve the growth index of *P. tabulaeformis* in DBH, tree height, physiology and other aspects, and the promotion effect of tree height and DBH under medium amount irrigation (A2) is even higher than that under high water (A3) treatment. (2) One year after fertilization, fertilization had a significant effect on the growth of *P. tabulaeformis*, but there was no significant differences among the three fertilization levels. (3) After one year of fertilization, there was no significant interaction between irrigation and organic fertilizer application. Fertilization and irrigation can significantly promote the growth of *P. tabulaeformis*. From the perspective of the effect of fertilization and comprehensive consideration of resource utilization efficiency, it is an economic and

基金项目：国家重点研发计划（2017YFD0600503）；北京市大兴区平原生态林建设及管护综合技术研究及推广项目（2016HXFWCXY037）[Supported by the National Key Research and Development Project（2017YFD0600503）; Comprehensive Technology Research and Extension Project of Plain Ecological Forest Construction and Management in Daxing District of Beijing（2016HXFWCXY037）]。

作者简介：张听雨（1993-），女，黑龙江哈尔滨人，硕士研究生，主要从事大径阶苗木培育管理技术的研究，(E-mail) 2659000426@qq.com。

***通信作者：**彭祚登，博士，副教授，主要从事苗木培育方面的研究，（E-mail）zuodeng@sina.com。

effective management and protection measure for *P. tabulaeformis* ecological forest to apply a small amount of organic fertilizer and drip irrigation in the growing season (April September) with the amount of 80 L ·(10 d ·plant ·time)$^{-1}$.

Key words: *Pinus tabuliformis*, irrigation, fertilization, tree growth

油松（*Pinus tabuliformis*）具有耐低温、干旱和贫瘠的特点，是我国北方温性针叶林中分布最广的森林群落，也是我国北方广大地区最主要的造林树种之一（王鹏和万盼，2018）。油松是北京平原造林工程中使用最广的树种之一，但是由于北京平原造林多采用大苗移栽，苗木定植后出现了死亡、长势较差、松梢螟较多等问题。由于水分、肥料间具有交互作用（宋修超等，2019），因此研究水肥耦合效应不仅可以在实践中提高水分与肥料的利用效率，还对改善生态环境具有重要的实际意义（陈培培等，2019）。因此本文旨在研究有机肥与灌溉对北京沙地油松的生长的影响。

据统计从 1960 年到 2008 年，氮、磷和钾肥料的全球消耗量的 3 000 万吨增长到 1.7 亿吨。大量使用肥料尤其是化肥已经使全球的土壤地下水硝酸盐浓度显著增加（Marinov & Marinov，2014）。早期研究发现水分的充足与否与肥料的施用量之间存在很大的相关性（Marinov & Marinov，1999），Aron（1975）最早进行开始研究关于在干旱地区控制灌溉水平下的合理施肥，大量研究表明不同的灌溉、施肥水平可能会对植物的生长发育产生协同、拮抗或叠加的不同效应，因此会对植物生理生态以及生长状况都产生不同的影响，合理的灌溉对养分的利用速率与肥效间存在着协同作用，提高灌溉量能显著增加氮肥的矿化速率和植物对氮的固定速率（Praehtje et al., 1994）。而合理施肥会影响土壤与植物间的水分热力学函数-偏摩尔自由能梯度，促进水分利用效率（Jones et al.,2003）。对于植物生长来说，施肥对干旱胁迫下的植物具有补偿作用，通过降低植物的水势，增加了深层土壤水分上移的动力（Barraclough，1989），缓解缺水造成的生理功能障碍，从而提高抗旱性，促进植物健康生长。但是由于施肥会显著促进植物的生长，尤其是叶片，如果灌溉量较小，就会在另一方面加剧植物受到的水分胁迫，因此水肥间的交互作用可能不仅仅是协同，还会有拮抗作用（Yadav et al.，1998）。合理的水肥定额对植物生长和生态环境的可持续发展均有重要意义。目前，部分关于水肥耦合的研究主要关注于三方面，一是植物功能性状对不同水肥耦合处理的响应研究，主要集中在光合作用和蒸腾作用等方面。二是关注水肥对于土壤肥力的影响以及如何促进植物 对土壤养分的吸收、转化和利用，有效协调植物与土壤的关系，实现养分高效利用。三是关注水肥对作物产品质量、数量以及品质的影响（喻阳华等，2019）。水肥一体化技术已经在我国农业生产领域得到了较为广泛的应用（高鹏等，2012）。但是在林业，尤其是大径阶苗木的培育管理上，鲜见相关报道。

近年来对于生态林的施肥研究逐渐从化学肥料转向有机肥、污泥肥等具有生态保护意义的肥料，一方面是出于成本与环境的考虑，另一方面是研究发现，无机肥虽然对植物生长的促进效果显著，但是只适用于短期补充，在持续改良土壤理化性质方面效果不佳，不利于大径阶苗木的持续养分供应（张宝娟等，2015），施用有机肥的土壤与施用化肥相比，能提高水分利用效率并为节约水资源提供良好的土壤条件（王小林，2016），而适宜的灌溉水平也会减少土壤养分的流失（Shang et al., 2016）。对城市生态林而言，园林废弃物堆肥生产的有机肥是经济有效、丰富便捷的肥料资源。然而相关应用研究却十分缺乏（王成等，2017），尤其是针对油松大苗造林后采用灌溉和施用有机肥耦合的效果研究更是空白。本研究旨在探究不同水肥配合处理水平对北京地区平原沙地生态油松林形态指标与生理指标的影响，为现阶段北京平原造林工程探索出经济、有效的生态林管护策略，提供有价值的科学依据。

1 试验地概况

试验地位于北京市大兴区永定河畔，地理位置为 116°14′19.88″E、39°36′47.01″N。属于暖温带半湿润大陆季风气候，年平均气温 12 ℃，年平均降水量 556 mm。

试验地的土壤质地为沙土，pH 值为 8.8，有机质含量为 4.95 g ·kg^{-1}，全氮 0.39 g ·kg^{-1}，有效磷含量为 13.1 mg ·kg^{-1}，速效钾含量为 11.78 mg ·kg^{-1}，碱解氮含量为 59.32 mg ·kg^{-1}。容积含水量为 26.5%。总孔隙度 54.1%，容重 1.25 g ·cm^{-1}，饱和含水量 39.19%。根据北京市土壤养分指标评分标准对该试验的土壤情况进行评价，该试验地的各项指标，除有效磷外均较低。土壤分层情况不明显，通透性较好，保水保肥能力较差，缺氮、少磷、少钾。浅层地下水位为 8~10 m，植物生长所需水分主要依靠灌溉。

2 材料与方法

2.1 试验材料

研究对象为大兴区油松大苗，试验所选用的北京市园林科学研究院利用园林有机肥作为试验材料，有机肥为园林绿化废弃物经堆肥处理后制成的。该肥料有机质的质量分数为 52%，总养分的质量分数为 6%，水分的质量分数为 5%，酸碱度为 7.5。灌溉水为地下水。

油松大苗于 2013 年定植，株行距为 4 m ×5 m，栽植行为东西走向。2016 年—2017 年不对油松进行修枝处理。2016 年末油松的平均胸径为 6.62 cm 左右，平均冠幅为 2.5 m。该试验地的油松苗木存在少量的松梢螟病虫害，长势较为一致。

2.2 研究方法

2.2.1 试验设计

采用裂区设计，主处理为灌溉量（A），副处理为施肥量（B）。其中灌溉处理分为 40 L ·（10 天 ·株 ·次）$^{-1}$、80 L ·（10 天 ·株 ·次）$^{-1}$（A2）、120 L ·（10 天 ·株 ·次）$^{-1}$（A3），施肥处理分为 5 kg ·株$^{-1}$（B1）、15 kg ·株$^{-1}$（B2）、25 kg ·株$^{-1}$（B3），空白对照不进行施肥、滴灌。试验进行 3 次重复，每个处理苗木数量不少于 20 株。

表 1　试验梯度设计

Table 1 Test processing gradient

副处理 Secondary treatment(B) 有机肥施入量 Application amount of organic fertilizer	主处理 Main treatment (A) 灌水额度 Irrigation quota		
	A1 40 L (10 天 株 次)$^{-1}$ 40 L (10 d ·plant time)$^{-1}$	A 2 80 L (10 天 株 次)$^{-1}$ 80 L (10 d plant time)$^{-1}$	A3 120 L (10 天 株 次)$^{-1}$ 120 L (10 d ·plant time)$^{-1}$
B1:5 kg 株$^{-1}$ B1:5 kg plant^{-1}	A1B1	A2B1	A3B1
B2:15 kg 株$^{-1}$ B2:15 kg plant^{-1}	A1B2	A2B2	A3B2
B3:25 kg 株$^{-1}$ B3:25 kg plant^{-1}	A1B3	A2B3	A3B3

施肥于 3 月初进行，在生长季（3 月—9 月）进行灌溉，每 10 d 灌溉一次，每次单株灌水量为 40、80 、120 L（后文简称低水、中水、高水处理）。施肥方式为距树 1.2 m 远，深度 20 cm 的地方进行环施。灌溉采用节水灌溉的方式进行滴灌，滴灌设施的铺设与调试于 2017 年 3 月末完成。

2.3 监测指标与数据采集

2.3.1 形态指标

第一次数据调查于 2017 年 2 月结束，第二次测定时间是 2018 年底。生长指标包括树高、胸径、冠幅、新枝长、顶稍长。其中树高使用激光测距仪进行测定，胸径于第一次测定时喷漆标记，第二次于相同位置测定。新枝长取东南西北四个方向的主枝的当年生长量，第二次测定的是第一次所选枝条的第二年生长量。

2.3.2 叶绿素含量

叶片叶绿素用 80 %的丙酮和 95 %的乙醇 1:1 混合成 20 mL 的混合液浸泡 0.2 g 的叶片后测定 663、646、470 三个波长的吸光值，计算叶绿素 a、叶绿素 b、胡萝卜素的含量。

2.3.3 叶片养分含量

植物叶片的全氮含量测定使用的是自动定氮仪法，全钾含量的测定使用了火焰光度计法，全磷的测定方法是钼锑抗比色法。

2.4 数据处理与分析

所有数据均使用 SPSS 16 和 Microsoft Office Excel 等统计软件进行分析。其中，显著性采用方差分析进行检验（*P*<0.05），多重比较采用邓肯氏（Duncan）新复极差测验法。

表 2 油松生长指标双因素方差分析的 *P* 值

Table2 *P* values of two factors ANOVA

指标 Index	树高 Height	胸径 DBH	冠幅 Crown	新枝长 New branch length	叶绿素 a Chlorophyll a
灌溉*施肥 Irrigation * fertilization	0.001***	0.026	0.255	0.350	0.933
灌溉处理 Irrigation treatment	0.000*	0.119	0.001**	0.000	0.583
施肥处理 Fertilization treatment	0.002	0.162	0.011*	0.427	0.171
指标 Index	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	叶片全氮 Leaf nitrogen	叶片全磷 Leaf phosphorus	叶片全钾 Leaf potassium
灌溉*施肥 Irrigation * fertilization	0.996	0.993	0.449	0.445	0.772
灌溉处理 Irrigation treatment	0.947	0.243	0.049	0.924	0.026
施肥处理 Fertilization treatment	0.964	0.830	0.608	0.973	0.846

注：*表示 *P*<0.05；**表示 *P*<0.01；***表示 *P*<0.001。

Note：* means *P*<0.05; ** means *P*<0.01; *** means *P*<0.001.

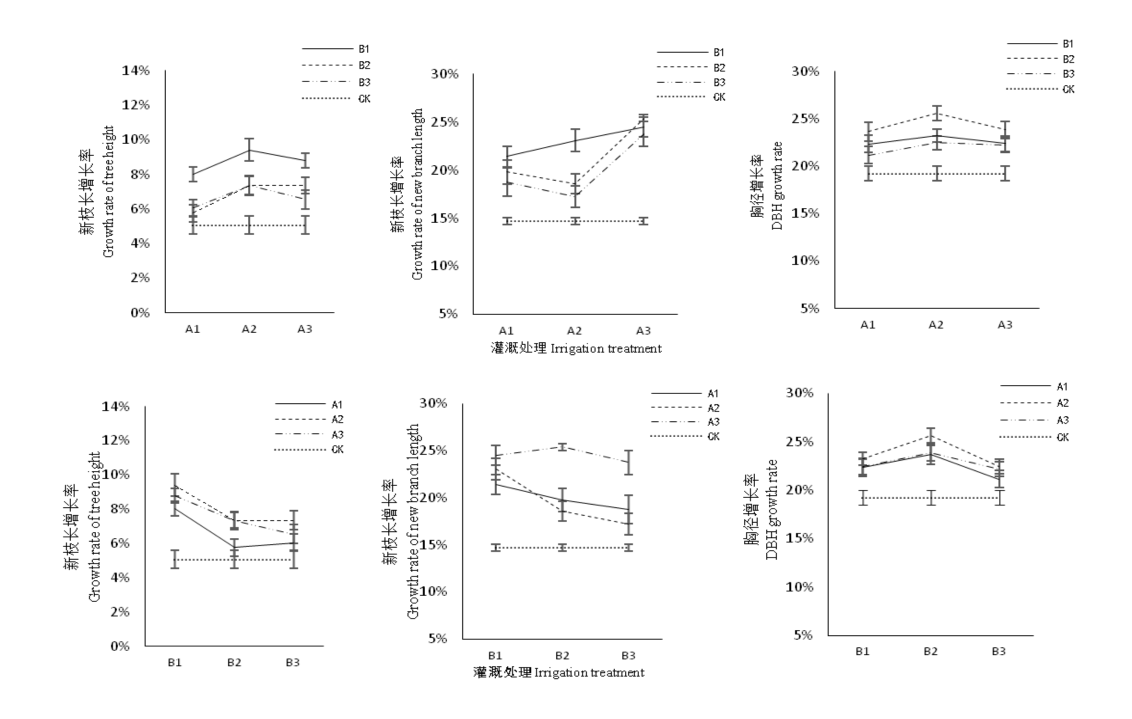
3 结果与分析

3.1 水肥处理对油松生长的影响

由表 2 可知，施肥、灌溉都会对树高、胸径、新枝长的生长的促进作用较为显著，树高的交互作用显著，胸径、新枝长的交互作用不显著。

对于油松的树高来说、胸径、新枝长来说，处理组的增长量与空白对照的增长量有显著差异。在低水的处理下，三个施肥水平的树高增长量均较小，中水（A2）的增长量均高于低水（A1），但是高水（A3）的增长量与中水（A2）没有显著差异。三个施肥水平中，中肥（B2）与高肥（B3）的增长率没有显著差异，低肥（B1）的增长率最高。灌溉施肥对胸径的影响与树高的相似，中水（A2）处理的增长率最高，且高水（A3）与低水（A1）的增长率没有显著差异。在三个施肥水平中，中肥（B2）对胸径的增长率的促进作用最为显著，高肥（B3）与低肥（B1）的增长率没有显著差异。

新枝长的增长率在三个施肥水平下，高水（A3）处理的增长率最高，中水（A2）高于低水（A1）。高水（A3）的处理下中肥（A3B2）的增长率最高，低水（A1）与中水（A2）的处理下，低肥（A1B1、A2B1）的增长率最高。



CK. 对照（不施肥和不灌溉）。**A1**. 低水灌溉；**A2**. 中水灌溉；**A3**. 高水灌溉。**B1**. 低肥；**B2**. 中肥；**B3**. 高肥。下同。

CK. Control(No fertilization and no irrigation). **A1**. Low amount irrigation; **A2**. Medium amount irrigation; **A3**. High amount irrigation. **B1**. Low fertilization; **B2**. Medium fertilization; **B3**. High fertilization. The same below.

图 1　水肥处理对油松生长的影响

Fig.1 Effects of water and fertilizer treatments on the growth of *Pinus tabulaeformis*

3.2 水肥处理对油松叶片叶绿素含量的影响

由表 2 可知，对照组叶片的叶绿素 a、b 与胡萝卜素的含量均显著低于各个处理组，交互作用不显著（a/b：*P*=0.974）。各指标均表现为处理结果均显著高于对照组，但各个处理之间的含量差异不显著。叶绿素 a 和类胡萝卜素在中水（A2）处理下含量略高于低水（A1），但高水（A3）处理下与中水（A2）相比基本没有提高。

各个处理下的叶片叶绿素 b 含量均高于对照组，但是与对照组没有显著差异。叶绿素 a/b 的值在处理和对照组之间具有极显著差异。中水（A2）具有较高的叶绿素 a/b 值。

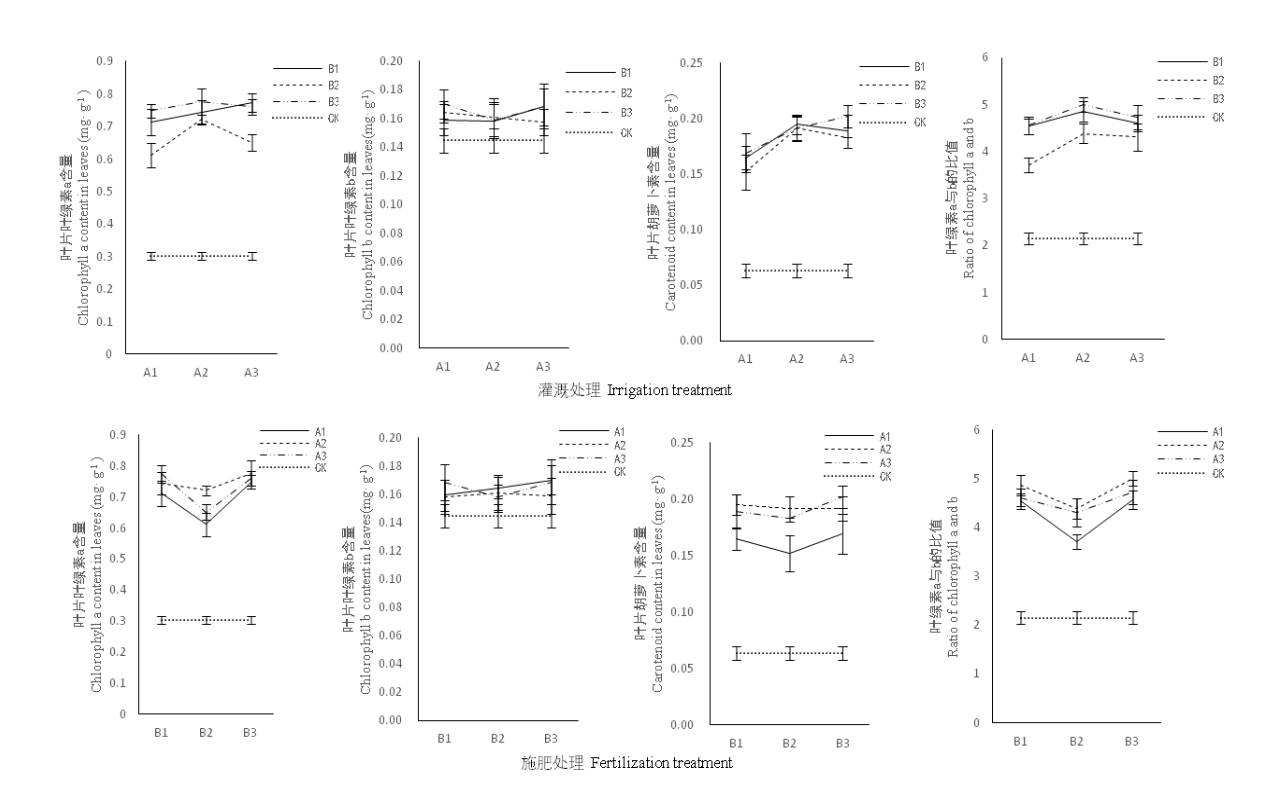


图 2 水肥处理对油松叶片叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of water and fertilizer treatments on chlorophyll content in leaves of *Pinus tabulaeformis*

3.3 水肥处理对油松叶片养分含量的影响

由图 3 可知，对照组叶片养分含量与处理组差异显著，交互作用不显著。但园林有机肥对叶片的不同养分含量的影响作用各不相同。叶片全含、全钾含量差异不显著，但处理组结果均显著高于对照组。由图 3 可知，不同施肥水平对叶片全 N、全 K 含量的影响差异不显著，且各个施肥水平下的三个灌溉水平对叶片全 N 的影响差异不显著，中水中肥（A2B2）的促进效果较好，低肥（B1）对叶片全 P 的促进作用最差。总体来说，仍是低水中肥（A1B2）效果较好。水肥处理后叶片全 N 与全 P 的比值有所下降，且与对照组存在显著差异。三个施肥水平下比值差异不显著（P=0.102），三个灌溉水平下比值存在显著性差异（P=0.009）。

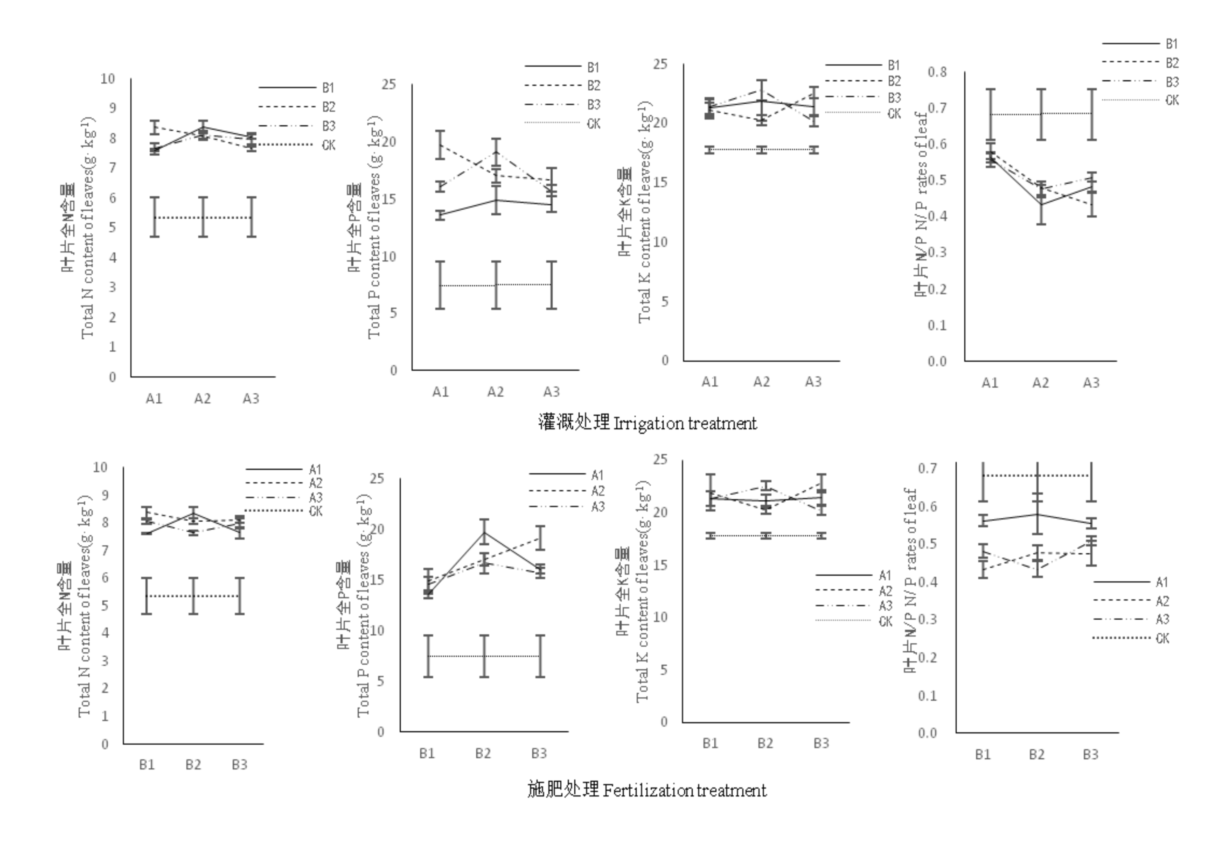


图 3 水肥处理对油松叶片养分含量的影响

Fig. 3 Effect of water and fertilizer treatments on nutrient content of leaves of *Pinus tabulaeformis*

4 讨论

油松各个方面的生长影响交互作用均不显著，但是水肥两个因素处理后的油松生长与对照组相比均存在显著的增长。

4.1 对油松形态生长的影响

根据施肥结果来看，高肥与中肥都不能显著提高油松的生长速率，但施用有机肥和灌溉措施会对周围土壤的养分含量产生较为显著的促进作用。这可能是因为试验时间过短，而油松的生长速度较慢，所以在一年的时间内三个施肥水平间没有显著差异，且试验地的土壤 pH 值较大，达到了 8.8，土壤中的养分无法被油松有效利用（孙向阳，2004）。土壤 pH 限制了油松对养分的吸收，即使施肥也不会对油松的生长起到极显著的促进作用。

分析油松生长、生理指标，发现高水或中水处理下的促进效果显著，但是高水与中水处理结果间的差异不显著。油松树高、胸径的结果都显示出高水处理结果低于中水。这一方面是由于 pH 会由于灌溉而减小（梁运江等，2011），高水处理下土壤的碱性变小，有利于油松吸收土壤中的养分，从而更有效的促进了油松的生长，但对油松林中土壤 pH 进行监测发现水肥处理下的土壤 pH 值减少有限，只能一定程度上减少 pH 对养分吸收的抑制作用。另一方面中水和高水处理间的结果差异不显著，可能是由于该示范区的土壤为沙土，沙地保水能力较差（周黄磊和黄升谋，2017），降水后，很快就会渗入地下。对油松进行灌溉，可有效改善水分条件，显著提高油松各个方面的生长量。但油松的最小生态需水量较少（刘淑明等，2004），无需对油松进行高水灌溉就可以得到较好的生长增量。由此可知在该文设计的三个施肥水平下，中水的灌溉量已经足够供给油松生长所需。最主要的是减小油松林地的土壤 pH 值。

韩培义和董文旭（2019）对油松喷施含腐植酸水溶肥料与喷清水相比:一是提高了油松抗病性，发病率较对照平均降低 6.5 个百分点，二是明显促进了油松的生长。这与本实验的结论相同，施肥、灌溉会对油松的形态指标产生显著的促进作用。

4.2 对油松叶片生理指标的影响

王虎兵等（2018）研究发现，低水胁迫下,增加施肥量可利于植株进行光反应进行。本研究发现低水处理下，增加施肥量会提高叶片的叶绿素含量，低水高肥处理下的油松的叶绿素 a、b 含量均高于低水低肥处理的结果，与之结果一致。

刘明占等（2013）对水肥调控下胡枝子的叶绿素含量变化进行了研究，发现随着灌水量和磷肥的增加，叶绿素含量持续升高；而随着施氮量的增加，其含量均先升高后降低。但本研究的结果表明过高的灌溉也不会对叶绿素的含量产生更为显著的促进作用，这很有可能是由于有土壤有效养分在土壤水分含量较高的情况下发生了转移，虽然结果高于对照组，但是在达到一定灌水量后，增加水量已无法增加根系周围有效养分的浓度了。而刘明占的试验地点是西北沙地，灌水量并未达到这个峰值。

4.3 叶片养分含量

水肥管理可以引起植物体内养分含量的变化，不仅会促进一部分养分含量的增加，还会引起部分养分含量的减少（李亚东等，1997；韩世健等，2010）。研究表明叶片养分的计量特征能够一定程度上反应植物对养分的利用策略和养分之间的关系（Koerselman，1996；Zhang et al.，2003；贺金生和韩兴国，2010）。吴海兰（2014）研究了不同水肥处理后红枣叶片的养分的影响。本试验的水肥处理后的油松叶片的 N、P 比值显著低于对照组，这与吴海兰的研究结果不一致。N、P 比值小于 14，说明处于 N 抑制的情况，且试验后油松生长受到 N 元素抑制的情况加剧了（Koerselman, 1996）。这说明在今后在该地区施肥时，在施用有机肥的同时可以应适当补充氮肥，或使用氮元素含量较高的有机肥。

总体来说，水肥处理一年后对植物生长老说，交互作用不显著，但水肥处理确会提高植物生长、生理指标产生促进作用。但考虑到资源利用效率，建议在进行生态林管护中，少量施用有机肥，并以 80L·（10 天·株·次）$^{-1}$ 的灌水量在生长季（4 月—9 月）进行滴灌是较为经济、有效的油松生态林管护措施。

参考文献：

ARNON I, 1975. Physiological principles of dry and crop production [A]. In: Gupta US. Physiological Aspects of Dryland Farming[C]. N Y: University Press: 3-124.

BARRACLOUGH PB, 1989. Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop[J]. Plant Soil, 119(1).

CHEN PP, YANG QQ, HOU JB, et al., 2019. Exploring the effect of water and fertilizer regulation on the growth of *Robinia pseudoacacia* plantation[J]. Agric Technol, 2019,39 (09): 84-86 [陈培培,杨倩倩,侯金波等, 2019. 探究水肥调控对刺槐人工林生长的影响[J]. 农业与技术，39(09)：84-86.]

GAO P, JIAN HZ, WEI X, et al., 2012. Application status and development prospect of water fertilizer integration technology [J]. Mod Agric Sci Technol, 8:250. [高鹏，简红忠，魏样，等，2012. 水肥一体化技术的应用现状与发展前景[J]. 现代农业科技, 8：250.]

HAN PY, DONG WX, 2019. Effect of humic acid containing water-soluble fertilizer on the growth of *Pinus tabulaeformis* [J]. Bull Agric Sci Technol, (11):111-112. [韩培义，董文旭，2019 含腐植酸水溶肥对油松生长的影响[J]. 农业科技通讯，(11)：111-112.]

HAN SJ, LU GY, JIANG MM, et al., 2010. Effect of water phosphorus coupling on NPK content of sugarcane leaves [J]. Guangxi Agric Sci, 41 (9): 938-942. [韩世健，陆国盈，蒋明明，等，2010. 水磷耦合对甘蔗叶片 NPK 含量的影响[J]. 广西农业科学，41(9)：938-942.]

HE JS, HAN XG, 2010. Ecological chemometrics: Exploring the theory of unity from individual to ecosystem[J]. J Plant Ecol, 34 (1): 2-6. [贺金生，韩兴国. 2010,生态化学计量学：探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 34(1): 2-6.]

JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER CH, et al., 2003. The DSSAT cropping system model[J]. Eur J Agron, 18: 235-265.

KOERSELMAN W, 1996. The vegetation N：P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. J Appl Ecol, 33: 1441-145.

LI YD, WU L, ZHANG ZD, WEN LK, 1997. Effects of N, NP, NPK fertilizer application on the growth, yield and leaf element content of bilberry[J]. Jilin Agric Sci, (3): 69-72. [李亚东，吴林，张志东，文连奎，1997. 土壤施 N、NP、NPK 肥对越桔生长、产量及叶片元素含量的影响[J]. 吉林农业科学，(3)：69-72.]

LIANG YJ, XU GB, XIE XH, et al., 2011. Effect of water and fertilizer treatment on soil pH value of pepper protected land[J]. Prog Water Conserv Hydrop Sci Technol, 31(2): 50-52. [梁运江，许广波，谢修鸿，等，2011. 水肥处理对辣椒保护地土壤 pH 值的影响[J]. 水利水电科技进展，31(2)：50-52.]

LIU MZ, CHEN ZL, TANG FD, 2013. Effect of water and fertilizer regulation on chlorophyll content of Lespedeza in Northwest Liaoning sandy land[J]. Liaoning For Sci Technol, (3): 1-2 . [刘明占，陈忠林，唐凤德，2013. 水肥调控对辽西北沙地胡枝子叶绿素含量的影响[J]. 辽宁林业科技，(3)：1-2.]

LIU SM, SUN CZ, SUN BY, 2004. Study on suitable irrigation quota of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* plantation[J]. For Sci, 6: 85-90. [刘淑明，孙长忠，孙丙寅，2004. 油松和侧柏人工林适宜灌溉定额的研究[J]. 林业科学，6：85-90.]

MARINOV I, MARINOV AM, 1999. A coupled mathematical model to predict the influence of nitrogen mohamed AR A[J]. Nitrogen Accumulation Seed yield Water Use Three, (20): 1-3

NATIONAL SOIL CENSUS OFFICE, 1998. Chinese soil [M]. Beijing: China Agricultural Press：356. [全国土壤普查办公室, 1998. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社:356.]

PRAEHTJE, NIEKELL CD, HARPER JE, et al., 1994. Agronomic evaluation of no-nodulating and hypemodulating mutants of soybean[J]. Crop Sci, 34(3): 738-739

SHANG FZ, REN SM, YANG PL, et al., 2016. Effects of different irrigation water types, N fertilizer types, and soil moisture contents on N_2O emissions and N fertilizer transformations in soils[J]. Water Air Soil Pollut, 227:225

SONG XC, QIU MH, GUO DJ, et al., 2019. Effects of water and fertilizer treatment on growth, water use efficiency and photosynthetic characteristics of watermelon cultivated in substrate [J]. Soil, 51 (2): 284-289 [宋修超，仇美华，郭德杰，等，2019. 水肥处理对基质栽培西瓜生长、水分利用效率及光合特性的影响[J]. 土壤，51(2)：284-289.]

SUN XY, 2004. Pedology[M]. Beijing: China Forestry Press:217. [孙向阳，2004. 土壤学[M]. 北京：中国林业出版社：217]

WANG C, JIA BQ, JIA GF, et al., 2017. Study on the effect and development strategy of afforestation in Beijing plain[J]. Urban For Chin, 15(6): 6-11. [王成，贾宝全，郄光发，等， 2017. 北京平原造林的成效与发展对策研究[J]. 中国城市林业，15(6)：6-11.]

WANG HB, CAO HX, HAO SX, et al., 2018. Effect of water and fertilizer coupling on growth and chlorophyll fluorescence parameters of greenhouse tomato[J]. J Drain Irrig Mech Eng, 36(10): 1047-1052. [王虎兵，曹红霞，郝舒雪，等，2018. 水肥耦合对温室番茄生长和叶绿素荧光参数的影响[J]. 排灌机械工程学报，36(10)：1047-1052.]

WANG P, WAN P, 2018. Growth regularity of *Pinus tabulaeformis* plantation in the xiaolongshan mountain[J]. J NW For Univ, 33(4):100-104. [王鹏，万盼，2018. 小陇山人工油松幼苗苗高生长研究[J]. 西北林学院学报，33(4)：100-104.]

WANG SQ, LI X, XU FA, et al., 2001. Effects of long-term application of chemical fertilizer and organic fertilizer on physical properties of tidal soil[J]. Chin J Ecol Agric, 2: 81-82. [王慎强，李欣，徐富安，等，2001. 长期施用化肥与有机肥对潮土土壤物理性质的影响[J]. 中国生态农业学报，2：81-82.]

WANG XL, 2019. Physiological basis of density and organic fertilizer to improve water use efficiency of film mulched spring maize[D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment of Ministry of Education). [王小林, 2016. 密度和有机肥提高覆膜春玉米水分利用效率的生理基础[D]. 北京：中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心).]

WU HL, 2014. The effect of water and fertilizer integration on the nutrient dynamics, quality and yield of jujube leaves[D]. Yangling: Northwest Agricultural and Forestry University of Science and Technology [吴海兰，2014. 水肥一体化对红枣叶片营养动态及品质和产量的影响[D]. 杨凌：西北农林科技大学]

YADAV RS, SHARWAR I, PANDEY UK, et al., 1998. Effect of various water potential treatment on nitrate reductase activity in wheat genotypes[J]. Agric Sci Dig, 18(2): 72-79

YANG SH, XIAO YA, XU IZ, 2018. Organic fertilizer application increases the soil respiration and net ecosystem carbon dioxide absorption of paddy fields under water-saving irrigation[J]. Environ Sci Pollut Res, 25: 9958–9968

YU YH, WANG Y, ZHONG XP, 2019. Current situation and prospect of water and fertilizer coupling research in plantation[J]. World For Res, 32 (2): 35-39 [喻阳华, 王颖, 钟欣平, 2019. 人工林水肥耦合研究现状及展望[J]. 世界林业研究，32(2)：35-39.]

ZHANG BJ, GUO SS, LI JQ, et al., 2015. Effects of soil mixing and fertilization on physical and chemical properties of iron tailings matrix and growth of *Pinus tabuliformis* and *Pinus sylvestris* seedlings[J]. For Sci, 51(5): 12-20. [张宝娟，郭耸松，李继泉，等，2015. 掺土和施肥对铁尾矿基质理化性质及油松、樟子松幼苗生长的影响[J]. 林业科学，51(5)：12-20.]

ZHANG LX, BAI YF, HAN XG, 2003. Application of N: P stoichiometry to ecology studies[J]. Acta Bot Sin, 45(9): 1009-1018.

ZHOU HL, HUANG SM, 2017. The effect of sink source relationship on chlorophyll content and chlorophyll a/b value of rice[J]. Green Technol, 24: 147-149. [周黄磊，黄升谋，2017. 库源关系对水稻叶绿素含量及叶绿素 a/b 值的影响[J]. 绿色科技，24：147-149.]